

М 266531

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
С С С Р

Московское  
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени  
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

---

Канунников Николай Николаевич

На правах рукописи.

Исследования влияния особенностей индукционной  
плавки на механические свойства и структуру  
синтетического дозвтектического чугуна  
(Диссертация написана на русском языке)  
(05.16.04 - литейное производство)

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва

1975 год

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена  
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище  
им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
Г.Ф.Баландин

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
А.А.Жуков.

кандидат технических наук А.А.Ламасов.

Ведущее предприятие - завод им. Седина /Краснодар/.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1975 г.

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1975 г.

на заседании Совета факультета "Автоматизация и механизация  
производства" Московского ордена Ленина и ордена Трудового  
Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана  
по адресу:

Москва Б-5, 107005, 2-я Бауманская ул., дом 5.

Ваши отзывы в 2-х экз., заверенные печатью, просьба высылать  
по указанному адресу.

эко училища.

Степанов

Заказ

Типогр

экз 120 экз.

5.

M 266531



1266531

Канунников Н.Н. Исследования

## ШАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие машиностроения требует резкого повышения качества чугунных отливок, выпуск которых в общем объеме литья в стране составляет 74-75%.

В Директивах XXIV съезда указана необходимость повышения качества отливок за счет внедрения индукционных печей промышленной частоты.

Цель работы является исследование и разработка оптимальных технологических параметров индукционной плавки и химического состава чугуна повышенной прочности, при одновременном сохранении высоких литейных свойств.

Общая методика выполнения исследований.

Исследования проводились с использованием современных методов металлографии, стандартных методик испытаний механических и литейных свойств. Упругие характеристики чугуна определяли при помощи модуля аккомодации, а для оценки причин и характера разрушения чугунных отливок разработана методика фрактографического анализа. В работе использовались методы математического планирования экспериментов с обработкой их результатов на ЭВМ " Минск - 22 ".

Научная новизна. Установлено, что процесс гомогенизации сложнлегированного железоуглеродистого расплава определяется не только индивидуальными диффузионными свойствами элементов сплава, но в основном условиями электродинамического перемешивания в печи. Неметаллические включения вместе с графитовыми конгломератами являются основной причиной, инициирующей разрушение чугунных отливок. Наиболее существенно влияние неметаллических включений у низковзвешенных чугунов.

Практическая ценность. Разработаны оптимальные технологические параметры выплавки чугуна в индукционной печи и химический состав чугуна с высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками. Разработана методика фрактографического анализа изломов чугуна. Разработаны практические рекомендации по использованию перемешивания для металлургической обработки чугуна в индукционной печи. На основании сравнительного анализа показано, что индукционный чугун по механическим свойствам и

структуре не уступает вагранчному, а при оптимальном технологическом режиме и химическом составе превосходит чугуны ваграночной плавки.

### Реализация работы в промышленности.

Разработанная технология плавки и внепечной обработки чугуна внедрена на компрессорном заводе "Борец" для отливок нефтепогружных насосов. Полученный экономический эффект составляет 30 тыс.руб. в год.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждены на Всесоюзной (Киев, 1972 г.) и на республиканской конференциях (Тула, 1972 г.) и изложены в трех опубликованных печатных трудах и одном авторском свидетельстве.

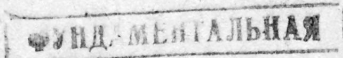
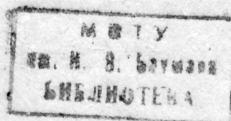
Объем работы. Диссертация изложена на 149 страницах машинописного текста, имеет 83 рисунка, 59 таблиц и приложение.

В первой главе проведен анализ современного состояния плавки чугуна в индукционных печах. Рассмотрено влияние термовременной обработки расплава, электродинамического перемешивания расплава, химического состава, модифицирования и микролегирования на формирование структуры и прочностные характеристики чугуна.

Плавка чугуна в индукционных печах экономически целесообразна в тех случаях, когда имеется достаточное количество отходов производства (стальной лом, стружка, обрезь проката и др.), а также при выплавке высококачественных чугунов.

Возможность достижения высокого перегрева при термовременной обработке и электродинамическое перемешивание расплава чугуна открывают дополнительные резервы для повышения качества чугунных отливок модифицированием и микролегированием. Теория модифицирования и легирования в настоящее время достигла больших успехов, в основном благодаря работам советских ученых П.А.Ресиндера, В.К.Семенченко, В.И.Данилова, Н.Д.Данкова.

Известные данные по сравнительному анализу ваграночной и индукционной плавки недостаточно корректны, так как при сравнении использовалась шихта с различной "наследственностью", не учитывались изменения химического состава в процессе термовременной обработки расплава и скорости охлаждения.



Несмотря на существование многих важных результатов в отношении получения индукционного чугуна потребности практики не удовлетворяются современным уровнем исследований. В настоящее время недостаточно изучены вопросы влияния состава шихты на свойства легированного чугуна, не определены оптимальные температуры перегрева, отсутствуют данные по гомогенизации легированного чугуна при использовании различных режимов электродинамического перемешивания.

На основании изложенного и в связи с поставленной целью в настоящей работе решаются следующие задачи:

1. Проводится сравнительный анализ структуры и механических свойств чугуна индукционной и ваграночной плавки.

2. Разрабатывается методика оценки причины разрушения чугунных отливок с помощью фрактографического анализа.

3. Исследуется влияние интенсивности электродинамического перемешивания, термовременной обработки расплава и химического состава на формирование структуры и механических свойств синтетического чугуна, выплавленного в индукционных печах из шихты на основе стали.

4. Исследуются пути и способы повышения прочностных характеристик синтетического чугуна при его микролегировании и модифицировании лигатурами РЗМ.

5. Разрабатываются параметры оптимального технологического процесса плавки для получения ответственных отливок из серого дисфтектического чугуна с высокими прочностными характеристиками и практические рекомендации по использованию результатов настоящей работы в промышленности.

Во второй главе изложены результаты сравнительного анализа структуры, механических свойств чугуна индукционной и ваграночной плавки и основные положения методики исследования.

Плавка и разливка металла. Экспериментальные плавки проводились в тигельных индукционных печах с кислой футеровкой, емкостью 60 и 150 кг с частотой тока 2400 гц. В качестве шихтовых материалов использовались стальные отходы, чугунная стружка, литейные чугуны, ферросплавы. Промышленная проверка результатов исследования проводилась в индукционных тигельных печах типа ИУТ - 0,2, ОКВ - 281,

Для сравнения свойств чугунов индукционной и ваграночной плавки, чугун выплавляли в вагранке завода "Станколит" (Москва) с кислой футеровкой, производительностью 10 т/час с подогревом дутья. Температура металла на желобе составляла 1370-1420°C, температура заливки - 1320 - 1350°C.

Анализ химического состава, содержание газов и неметаллических включений, металлографические исследования структуры и испытания механических свойств чугунных отливок проводили в соответствии с ГОСТ для этих видов исследований.

Модуль аккомодации чугуна определяли по диаграмме напряжения-деформация после первого цикла нагружения.

Величину интенсивности электродинамического перемешивания в индукционной печи изменяли за счет количества расплава в тигле и концентрации выделяемой энергии на его рабочей поверхности. Количественную оценку интенсивности перемешивания проводили по следующей формуле:

$$N_{\text{удп}} = 31,6 \sqrt{\frac{\mu}{f}} \frac{N}{F h_0} \cdot 100, \%$$

где:  $\mu$  - магнитная проницаемость, гн/м;  
 $h_0$  - высота расплава при выключенном токе, м;  
 $N$  - мощность, индуцируемая в металле, кВт;  
 $F$  - боковая поверхность тигля, м<sup>2</sup>;  
 $\rho$  - уд. сопротивление чугуна, ом·см;  
 $f$  - частота тока, гц.

Литейные и технологические свойства отливок (жидкотекучесть, линейная усадка, отбел, остаточные напряжения) определяли по стандартным методикам.

При оптимизации технологических параметров плавки чугуна и состава шихты применялись математические методы планирования экспериментов. Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием ЭВМ "Минск - 22".

При проведении сравнительного анализа свойств чугунов индукционной и ваграночной плавки за основу была принята ваграночная технология плавки завода "Станколит" (Москва) и исследованы следующие чугуны:

1) Ваграночный чугун завода "Станколит"; 2) индукционный переплав ваграночного чугуна; 3) индукционный чугун из ваграночной шихты; 4) индукционный чугун из синтетической шихты.

Проведенные исследования позволяют заключить, что в индукционной печи даже при ваграночной технологии плавки можно по-

требуемый химический состав. При использовании синтетической шихты содержание серы и фосфора в чугунах в два раза меньше по сравнению с ваграночной.

Общее газосодержание в чугунах индукционной плавки меньше, чем в ваграночном чугуне в 1,5-3,0 раза. Снижение содержания газа при индукционной плавке происходит в основном за счет уменьшения концентрации кислорода в расплаве чугуна.

Общее количество неметаллических включений в индукционном чугуне в 1,5 раза меньше, чем в ваграночном. Увеличение температуры перегрева эффективно влияет на эвакуацию включений и при температуре 1600°C содержание неметаллических включений в индукционном чугуне в 2 раза меньше, чем в ваграночном.

Чугуны индукционной плавки несущественно отличаются по прочностным характеристикам от ваграночного чугуна. При замене ваграночной шихты на синтетическую и оптимизации параметров технологии модуль аккомодации и прочность чугуна при изгибе у синтетического чугуна выше, чем у ваграночного на 10-15%. Для синтетического чугуна лучшие прочностные показатели имеет шихта на основе спокойных среднеуглеродистых сталей (Ст3, У-8, У-12), по сравнению с шихтой из малоуглеродистой стали (а.м.ч.-железо).

Металлографический и термографический анализы показали, что чугуны индукционной плавки по структуре практически не отличаются от ваграночной. При использовании синтетической шихты и проведении термовременной обработки расплава наблюдается улучшение структуры графита и увеличение дисперсности перлита за счет более глубокого переохлаждения чугуна.

Третья глава посвящена разработке методики оценки причин разрушения чугунных отливок с помощью фректографического анализа. Исследование трещин отливок проводилось на растровом электронном микроскопе со сканирующей головкой "Стереоскан-10А".

Для понимания особенностей строения трещин таких сложных сплавов, как чугун, прежде всего были получены трещины стальных отливок (армированное железо и легированная сталь). Исследованные стали имеют в основном вязкий транскристаллитный излом с "чашечным" строением рельефа. Отличительной особенностью легированных сталей является наличие неметаллических включений на дне "чашечек". При разрушении металла образуется шейка, которая в предельном случае

вырождается в конус. Этот процесс является результатом продолжительного сдвига по плоскостям скольжения в районе шейки, заканчивающегося срезом в одной точке.

Для отливок из белого чугуна характерно хрупкое транскристаллитное разрушение с различными типами сколов. В низкоуглеродистом легированном молибденом и хромом чугуне на образующихся глыбах перлита наслаивается фосфидная эвтектика.

Механизм зарождения трещин, так же как и в случае вязкого разрушения, объясняется с позиций механизма Стро, генеральная идея которого состоит в торможении атомных процессов предварительной деформации различными препятствиями. В этом проявляется общность деталей тонкого строения вязких и хрупких изломов, а их различие в характере распространения трещины, обусловленном состоянием материала и условиями его разрушения.

В отливках из серого чугуна с перлитной матрицей в основном транскристаллитный тип излома, а при ферритной резко увеличивается доля межзеренного. Причиной межзеренного разрушения сильно перегретого (1650–2000°C) серого чугуна является междендритный графит, который резко ослабляет междискристаллитные связи.

Характер излома отливок из чугуна с шаровидным графитом аналогичен вязкому транскристаллитному излому стали. Ополо сферы графита наблюдается вытянутая в сторону приложения нагрузки зона пластичной матрицы.

Исследование причин разрушения чугунных отливок методом фототграфии позволило установить, что: а) трещина зарождается как на границе, так и внутри зерна; б) инициатором зарождения трещины внутри зерна является графитовый конгломерат или неметаллическое включение, вблизи которых наблюдаются различные типы разрушения; в) неметаллические включения располагаются в основном на границе эвтектических зерен и являются вторым после графита фактором разрушения. Наиболее существенно их влияние в доэвтектических синтетических чугунах.

Проведенные исследования показывают, что для получения чугунов с повышенными прочностными характеристиками необходимо добиваться увеличения доли транскристаллитного излома, упрочнять междискристаллитные связи и прочность зерна, в связи с этим к структуре чугуна необходимо предъявить следующие требования: 1. Матрица должна быть перлитного класса, тонкодисперсной, мелкозернистой и упрочненной легирующими добавками. 2. Фосфидные и ледебуритные эвтектики,

газовая и усадочная пористость должны отсутствовать. 3. Количество и размер неметаллических включений в структуре чугуна должны быть минимальны, а имеющиеся рассредоточены на расстояние не менее 150 мк. 4. Длина графитовых конгломератов должна находиться в пределах 50-100 мк и толщина 8-10 мк, с округлыми окончаниями и расстоянием между конгломератами не менее 80-100 мк. В структуре чугуна должен отсутствовать междендритный графит. 5. Величина остаточных напряжений в отливке, количество микротрещин на границе и внутри зерна должны быть минимальны.

Четвертая глава посвящена разработке технологических режимов металлургической обработки расплава синтетического чугуна в индукционной печи, с целью его дегазации и очистки от неметаллических включений и повышения прочностных характеристик чугуна.

Исследования показали, что газы, способствующие образованию междендритной пористости, так же, как и неметаллические включения, ослабляют межкристаллитные связи и дезактивируют зародышевую фазу, увеличивая при этом переохлаждаемость расплава.

В жидком синтетическом чугуне реализуются благоприятные условия для столкновения крупных пузырьков газа с удлинёнными пакетами графита при интенсивном их перемешивании.

При повышении температуры перегрева и времени выдержки наблюдается общее <sup>снижение</sup> содержания газов в расплаве. Оптимальной температурой перегрева при дегазации синтетического чугуна является 1520-1550°C при 5-7 минутах выдержки. В интервале металлургического равновесия скорость поглощения кислорода чистым железом становится одного порядка со скоростью поглощения кислорода окисляющимся кремнием и углеродом, что приводит к скачку содержания кислорода в чугуне (с 0,008% при 1400°C до 0,013% при 1450°C).

За счет общего снижения содержания газов в расплаве уменьшается количество неметаллических включений, удаление которых ускоряется в индукционной печи при перемешивании и последующей выдержке. Если для дегазации расплава необходимы максимальные скорости перемешивания, то скорости всплывания частиц определенные по формуле (2) уменьшаются из-за повышения скоростей турбулентных пульсаций.

$$Re = \sqrt{\frac{8}{3}} \frac{A_2}{C_2} (1 - K_2 \rho) \quad (2)$$

где:  $Re$ ,  $A_2$  — критерий Рейнольдса и Архимеда

$\rho$  — критерий, характеризующий адгезию, неметаллических включений в жидком металле

$K_2$  — коэффициент, учитывающий форму частицы.

Наиболее эффективное удаление неметаллических включений получено, во — первых, при перемешивании расплава с интенсивностью не более 2,4% и последующей выдержкой в течение 15–20 минут, во — вторых, при импульсном перемешивании с интенсивностью 10% при наведенном известково-глиноземистом шлаке и последующей выдержкой 10–15 минут.

В пятой главе приведены результаты исследований влияния технологических режимов плавки (режимов электродинамического перемешивания и термовременной обработки) на микроструктуру и механические свойства синтетического чугуна.

С помощью методов планирования экспериментов получена математическая модель, позволяющая активно влиять на прочность чугуна в отливках технологическими параметрами процесса плавки.

$$B_c = 65,0C - 47,1S - 25,4P - 50,8q_m + 1,05T + \\ + 3,4H_{зап} - 27,8C^2 - 7,33Si^2 + 1,48Mn^2 + 0,06TC + \quad (8) \\ + 0,039Tq_m - 0,96CH_{зап} - 82,4S^2 - 0,00041T^2 - \\ - 0,01H_{зап} - 0,01Cq_m - 803,2.$$

Для повышения достоверности разрабатываемой модели в программе, осуществленной на ЭВМ "Минск-22", был заложен последовательный отсев несущественно влияющих аргументов. За критерий отсева использовалось минимальное значение критерия Стьюдента и отсев проводился до тех пор, пока значение коэффициента множественной корреляции уравнения регрессии не становилось максимальным.

Анализ матрицы коэффициентов частной корреляции уравнения регрессии показал, что наиболее существенные связи с прочностными характеристиками чугуна имеют в порядке убывания — содержание углерода в чугуне, количество и вид введенного модификатора, содержание марганца и кремния.

Процесс науглероживания лимитируется при выплавке синтетического чугуна термовременными характеристиками плавки и интенсивностью перемешивания. Одна из основных особенностей индукционной плавки — электродинамическое перемешивание позволяет проводить в тигле печи активную металлургическую обработку расплава: дегазацию, дефосфорацию, рафинирование и гомогенизацию сложнелегированного сплава.

На основании экспериментальных данных по гомогенизации легированного (молибденом, хромом, кремнием) железоуглеродистого

расплава и теоретического анализа массообменных процессов протекающих в индукционной печи установлено, что индивидуальные диффузионные свойства элементов сплава практически не влияют на процесс гомогенизации и последний определяется только гидродинамической обстановкой.

При повышении интенсивности электродинамического перемешивания достигнуто увеличение скорости гомогенизации расплава чугуна более чем в пять раз, стабильность результатов механических испытаний увеличилась в два раза, однако, абсолютные значения прочностных характеристик изменились незначительно. При увеличении интенсивности перемешивания более 10-12% снижается стойкость футеровки индукционной печи.

Проведение исследования позволили сформулировать практические рекомендации по проведению электродинамического перемешивания в процессе металлургической обработки расплава в индукционной тигельной печи.

Для чугунов с различным углеродным эквивалентом установлена эмпирическая зависимость предела прочности при растяжении от температуры перегрева,

$$\sigma_{\sigma} = 1,032 T - 0,00041 T^2 + 0,067 C_{\Sigma} - \frac{16,8}{C_{\Sigma} \cdot 0,31(5,6-P)} - 27,8 C_{\Sigma} - 89,4 C_{\Sigma} - 817,47 \quad (4)$$

с помощью которой определены оптимальные температуры перегрева. При увеличении углеродного эквивалента оптимальные температуры смещаются в область более высоких перегревов над температурой металлургического равновесия. Так она равна 50-60°C для чугунов  $C_{\Sigma} = 3,2-3,4\%$  и 150-180°C для чугунов  $C_{\Sigma} = 4,0-4,6\%$ . Смещение оптимальной температуры перегрева в область высоких значений объясняется необходимостью повысить активационную способность перегрева, а, следовательно, и степень пересохлажденности расплава для высокоуглеродистых чугунов.

В действительном сером чугуне в процессе охлаждения можно получить всю гамму форм графита. Каждому типу графита соответствует определенная степень пересохлаждения расплава и скорость охлаждения, численные значения которых во многом зависят от степени затектичности и перегрева чугуна.

Термодинамический расчет и проведенные эксперименты показали, что основной причиной формирования грубых конгломератов графита, резко снижающих прочность чугуна при температурах перегрева ниже равновесных, является дезактивация включений графитовых зародышей.

Экспериментальные плавки чугуна в магнитном поле во взвешенном состоянии, в плазменной и электроннолучевой установках показали, что упрочняющее действие термовременной обработки расплава на структурные составляющие синтетического чугуна определяется его дегазацией и физикохимическим взаимодействием с футеровкой тигля.

Увеличение температуры перегрева повышает упругую характеристику чугуна — модуль аккомодации, который характеризуется исключительно зависимостью от величины графитовых включений. Уменьшение отношения длины включений к их толщине резко увеличивает модуль аккомодации, который достигает у синтетического серого легированного чугуна  $10500 \text{ кг/мм}^2$ , а для белого достигает  $22000 \text{ кг/мм}^2$ .

В шестой главе проводились исследования легированного синтетического чугуна. Ранее было показано, что путь повышения прочностных характеристик чугуна за счет снижения его эвтектичности имеет предел, определяемый появлением в структуре чугуна при эвтектичностях ниже 0,75 — 0,80 метастабильных составляющих, резко снижающих прочностные и упругие характеристики. Эффективным средством дальнейшего совершенствования качества синтетического чугуна является его микролегирование с комплексным модифицированием. Синтетический чугун легировался молибденом и хромом с последующим модифицированием кремнием и лигатурами РЗМ.

Учитывая большое влияние на процесс формирования свойств хромомолибденового чугуна фосфора, была предварительно проведена дефосфорация чугуна синтетическими шлаками. После наведения основного шлака (известь и железная руда) проводилось электродинамическое перемешивание расплава при температуре  $1400^\circ \text{C}$  с последующей выдержкой 10–15 минут. Равновесное содержание фосфора для данной температуры достигалось через 10 минут. Снижение содержания фосфора в расплаве до 0,04% уменьшило склонность легированного чугуна к масштабному фактору, увеличило стабильность результатов и повысило среднюю прочность на разрыв.

Исследование распределения молибдена в чугуне показало, что он сильно лигвирует в процессе кристаллизации в зоне повышенных температур, что приводит к неравномерности свойств чугуна при низких скоростях охлаждения. Склонность фосфора и молибдена к ликвации, усиливающаяся в присутствии кремния, приводит к образованию в легиро-

ванном чугуна легкоплавкой эвтектики — Fe-C-P-Mo, которая при низких скоростях охлаждения образует рыхлоты. Молибден практически не воздействует на структуру графита, однако, его влияние на металлическую основу существенно.

При увеличении содержания молибдена до 0,4–0,5% у эвтектического чугуна возрастает доля феррита, а при последующей добавке молибдена (до 0,8%) в структуре резко повышается количество перлита. Для доэвтектического чугуна при увеличении содержания молибдена (до 0,8%) монотонно повышается доля феррита и, соответственно, снижается количество перлита.

При легировании чугуна молибденом (до 0,8%) и хромом (до 0,3%) на кривых изменение прочности наблюдается экстремум, что позволило установить оптимальное содержание молибдена (0,4–0,5%) и хрома (0,2–0,3%) в синтетическом доэвтектическом чугуна. Максимальная прочность при растяжении  $50 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$  была достигнута при содержании в чугуне 0,8% молибдена и 0,22% хрома. Однако, у этого чугуна относительно низкие упругие характеристики (могуль accommodations равен  $10500 \text{ кг/мм}^2$ ) и плохие литейные свойства (отбел равен 3–10 мм, остаточные напряжения 3,0–4,0  $\text{кг/мм}^2$ ).

Термодинамический анализ модифицирующего действия элементов и результаты экспериментального исследования показали, что наиболее активными являются кальций, магний, церий и кремний. На основе этих элементов был разработан комплексный модификатор, введение которого в количестве 0,4–0,5% при температуре модифицирования  $1400^\circ \text{C}$  позволяет существенно повысить прочностные характеристики синтетического легированного чугуна.

Фрактографический анализ изломов легированных чугунов показал, что в случае перлитной матрицы изломы как и у нелегированного чугуна идут в основном по границе графит-матрица и сколом по самой матрице. При появлении в структуре ледесбурита и фосфидной эвтектики процесс разрушения проходит по их границе с матрицей. Трещины зарождаются в междузлах ветвей дендрита и распространяются между ними.

На основании проведенных исследований и промышленной проверки предложен для машиностроительного литья синтетический чугун следующего химического состава:

%C = 3,0–3,1; %S = 2,6–2,8; %Mn = 0,14–0,20;

%Si = 0,2–0,3; %Mo = 0,4–0,5%; %S = до 0,03;

%P до 0,05.

Для внепечной обработки данного чугуна разработан комплексный модификатор следующего химического состава (% к весу металла)

% Si = 0,26; % Ca = 0,07; % Mg = 0,01; % Ce = 0,1;  
% La = 0,05; % (Pr + Nd) = 0,05. Механические свойства чугуна:

$\sigma_c = 40 \text{ кг/мм}^2$ ;  $\sigma_{из} = 90 \text{ кг/мм}^2$ ;

Вак = 14000 кг/мм<sup>2</sup>. Отличительной особенностью данного сплава являются относительно высокие прочностные и упругие характеристики при хороших литейных свойствах.

Методом симплексного планирования экспериментов определены оптимальные составы шихт для получения коррозионностойкого синтетического чугуна. Используя полученные уравнения регрессии, можно прогнозировать свойства чугуна при любых соотношениях шихт:

$$\sigma_c = 30,6 X_1 + 39,8 X_2 + 36,4 X_3 - 1,2 X_1 X_2 - 2,8 X_1 X_3 - 3,2 X_2 X_3 - 18,9 X_1 X_2 X_3 \quad (5)$$

$$\sigma_{из} = 74 X_1 + 93,2 X_2 + 81,0 X_3 + 9,2 X_1 X_2 + 10,0 X_1 X_3 - 20,8 X_2 X_3 - 107,7 X_1 X_2 X_3 \quad (6)$$

$$V_k = 20,8 X_1 + 19,7 X_2 + 20,2 X_3 + 1,8 X_1 X_2 - 0,4 X_1 X_3 - 0,6 X_2 X_3 - 6,6 X_1 X_2 X_3 \quad (7)$$

где:  $X_1; X_2; X_3$  - количество чугунной стружки, стальных отходов и возврата в шихте, соответственно, в %.

$V_k$  - коррозионная стойкость чугуна, г/час·м<sup>2</sup>

На основании экспериментальных данных и промышленного опробования разработан технологический процесс на производство отливок деталей компрессоров и внедрен на заводе "Борец" с экономическим эффектом 30 тыс.руб. в год.

### Общие выводы.

1. На основе проведенных исследований разработан и внедрен в производство технологический процесс выплавки индукционного чугуна с высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками.

2. Анализ результатов проведенных исследований показал, что чугуны индукционной плавки не уступают по прочностным харак-

теристикам ваграночному. При замене ваграночной шихты на синтетическую и оптимизации технологического процесса индукционной плавки получаемый чугун содержит в 2,0–2,5 раза меньше серы, фосфора, кислорода и водорода, на 30–35% меньше неметаллических включений, на 10–15% выше упругие характеристики чугуна, чем у ваграночного.

3. Разработанная методика фратографического анализа изломов чугуна показала, что индикатором зарождения трещины внутри зерна является графитовый конгломерат, а при степени графитизации ниже 2,0 – неметаллические включения.

4. Исследования перегретого до 2000°C чугуна показали, что причиной хрупкого межзеренного разрушения отливой является ослабление межкристаллитных связей междендритным графитом при любой матрице чугуна.

5. Разработана математическая модель процесса выплавки чугуна в индукционной печи, позволяющая оптимизировать технологические параметры и химический состав чугуна с высокими прочностными характеристиками.

6. На основании анализа матрицы коэффициентов частной корреляции показано, что лимитирующим при выплавке синтетического чугуна является процесс науглероживания, определенными термовременными характеристиками плавки и интенсивностью перемешивания.

7. Установлены оптимальные температуры перегрева для синтетических чугунов с различной эвтектичностью.

8. Установлено, что при плавке чугуна в индукционной печи благодаря электродинамическому перемешиванию можно проводить активную металлургическую обработку жидкого чугуна, с целью снижения содержания газов, неметаллических включений и гомогенизации сложнолегированного сплава. На основании проведенных исследований разработаны практические рекомендации по использованию перемешивания для металлургической обработки чугуна в индукционной печи.

9. Термодинамический анализ элементов модификатора и экспериментальные исследования показали, что наиболее активными являются кальций, магний, церий, кремний, на основе которых был разработан комплексный модификатор, введение которого в количестве 0,4–0,5% при температуре 1300°C, позволяет существенно повысить

прочностные характеристики синтетического легированного чугуна.

10. Методом симплексного планирования экспериментов определены оптимальные составы шихт для получения коррозионностойкого легированного чугуна и получены математические модели, связывающие прочностные характеристики чугуна с составом шихты.

11. На основании проведенных исследований разработан сплав, обладающий повышенными механическими ( $\sigma_s = 40-42 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_{0.2} = 94-96 \text{ кг/мм}^2$ ,  $E_{\text{ак}} = 14000 \text{ кг/мм}^2$ ) и эксплуатационными свойствами.

12. Результаты работы внедрены на заводе "Борец" с экономическим эффектом 30000 руб. в год.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Канунников Н.Н. Микрофрактографическое исследование излома в отливках из синтетического чугуна "Известия вузов. Машиностроение", №1, 1974г.
2. Канунников Н.Н. Синтетический легированный чугун. "Литейное производство", №2, 1974г.
3. Авторское свидетельство № 352703. Покрытие для литейных форм.
4. Дибров И.А., Канунников Н.Н. Повышение качества чугуна при плавке в индукционных печах. "Технология производства, научная организация труда и управления", НИИМАШ, №5, 1974г.